·论著·

本体感觉神经肌肉促进技术联合螺旋稳定肌肉链训练治疗青少年特发性脊柱侧弯的临床效果研究

聂丹宁，史曙生*，陶昱如

210023 江苏省南京市，南京师范大学体育科学学院
*通信作者：史曙生，教授/博士生导师；E-mail：sssmxy@126.com

【摘要】 **背景** 研究显示我国中小学生脊柱侧弯率为4.40%，高发年龄在13~15岁，有79.5%的学生为轻度脊柱侧弯，发病人数和侧弯程度随时间呈现增年性趋势，防控形势严峻。**目的** 探讨每周3次的本体感觉神经肌肉促进技术（PNF）联合螺旋稳定肌链训练（SPS）对青少年特发性脊柱侧弯（AIS）的疗效，可促进青少年脊柱健康管理工作高质量发展，为实现多方位筛查监测和脊柱侧弯精准防控提供参考。**方法** 2024年1~3月筛查江苏省南京市中小学生1 060名，最终共纳入年龄10~18岁、躯干旋转角（ATR）为5° ~<10° 的32名AIS学生作为研究对象，根据先前受试者选取的电子脊柱测量指标和Sorense测试（BST）中表面肌电的测量，将学生随机均等分组为SPS组、PNF组、联合组和对照组，每组各8名。4组学生进行为期12周的运动干预，每周进行3次训练：SPS组只采用SPS，PNF组只采用PNF，联合组采用SPS联合PNF，对照组采用传统的核心稳定训练。主要结果测量将包括脊柱侧弯程度和躯干倾斜角度（ATI），次要结果测量包括身体平衡参数头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度和表面肌电图指标均方根肌电值（RMS）、积分肌电值（IEMG）、中频（MF）和平均功率频谱（MPF）。比较4组干预前后的脊柱形态学和表面肌电图指标，采用相关性分析探讨电子脊柱测量值与运动干预前后表面肌电图值的相关性。**结果** 4组学生基线年龄、BMI、脊柱侧弯类型、脊柱侧弯方向、脊柱侧弯部位、脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度比较，差异均无统计学意义（P>0.05）。干预后联合组学生脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度均低于对照组（P<0.05）；与干预前相比，SPS组、PNF组、联合组学生干预后脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度均降低（P<0.05）。相关性分析结果显示，干预前后ATI、RMSR与干预前后脊柱侧弯程度均呈正相关（P<0.05）；干预后ATI与干预后头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度呈正相关（P<0.05）；干预后RMSR与干预后头部偏转度、臀部高低程度呈正相关（P<0.05）。联合组学生干预后两侧斜方肌的RMS、IEMG高于PNF组，两侧多裂肌的RMS、IEMG高于对照组（P<0.05）；与干预前相比，SPS组、PNF组、联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的RMS、IEMG均升高，干预后总体RMS比值（RMSR）均降低（P<0.05）。与干预前相比，SPS组和联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的SlopeMF均升高；PNF组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、左侧多裂肌的SlopeMF升高（P<0.05）。与干预前相比，SPS组、PNF组、联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、左侧多裂肌的SlopeMPF均升高；SPS组、联合组学生干预后右侧多裂肌的SlopeMPF均升高（P<0.05）。干预后肩部高低程度与两侧斜方肌、右侧多裂肌RMS，左侧斜方肌、左侧竖脊肌、右侧多裂肌SlopeMF呈负相关（P<0.05）；臀部高低程度与两侧斜方肌、两侧多裂肌RMS，左侧斜方肌SlopeMPF呈负相关（P<0.05）。**结论** 各试验组（SPS组、PNF组、联合组）的ATI、身体平衡度以及表面肌电图值在治疗后均显著改善，联合组在肩部和臀部平衡度方面的治疗效果尤为突出，治疗后联合组两侧椎旁肌的抗疲劳能力也得到了提升。PNF联合SPS的干预方式能够通过激活更多的运动肌纤维并提高肌肉疲劳耐受力，进而使AIS学生受益。

【关键词】 脊柱弯曲；青少年特发性脊柱侧弯；螺旋稳定肌肉链训练；本体感觉神经肌肉促进技术；脊柱侧弯特异性练习；随机对照试验

【中图分类号】 R 682.3 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0562

基金项目：国家社科基金项目（21BTY024）

引用本文：聂丹宁，史曙生，陶昱如. 本体感觉神经肌肉促进技术联合螺旋稳定肌肉链训练治疗青少年特发性脊柱侧弯的临床效果研究[J]. 中国全科医学，2025. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0562. [Epub ahead of print]. [www.chinagp.net]

NIE D N，SHI S S，TAO Y R. Clinical effect of proprioceptive neuromuscular facilitation technique combined with spiral stabilizer muscle chain training in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Chinese General Practice，2025. [Epub ahead of print].



Clinical Effect of Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Technique Combined with Spiral Stabilizer Muscle Chain Training in the Treatment of Adolescent Idiopathic Scoliosis

NIE Daning, SHI Shusheng, TAO Yuru

Faculty of Sports Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

**Corresponding author: SHI Shusheng, Professor/Doctoral supervisor; E-mail: sssmxy@126.com*

【Abstract】 **Background** Research shows that China's primary and secondary school students scoliosis rate of 4.40%, the high incidence of age 13-15 years old, 79.5% of students with mild scoliosis, the number of incidence and the degree of scoliosis with the time of the annual trend, prevention and control of the situation is grim. **Objective** To investigate the efficacy of 3-times-weekly proprioceptive neuromuscular facilitation (PNF) technique combined with spiral stabilizing muscle chain training (SPS) on adolescent idiopathic scoliosis (AIS), which can promote the high quality of adolescent spinal health management work and provide a reference to achieve multifaceted screening and monitoring and precise scoliosis prevention and control. **Methods** The experiment was designed to screen 1 060 primary and middle school students in Nanjing from January to March 2024. A total of 32 AIS students aged 10 to 18 years with an angle of trunk rotation (ATR) of 5° to <10° were finally included as study subjects, and the students were randomly and equally grouped into the SPS, PNF, combined, and control groups of 8 students each based on electronic spinal measurements selected from previous subjects and surface electromyography measurements in Sorensen test. The 4 groups of students underwent a period of 12-week exercise intervention with 3 training sessions per week: the SPS group used only SPS, the PNF group used only PNF, the combined group used SPS combined with PNF, and the control group used traditional core stabilization training. The primary outcome measures will include the degree of scoliosis and the angle of trunk inclination angle (ATI), and the secondary outcome measures will include the body balance parameters of head deflection, shoulder height, hip height, and the surface electromyographic indices of root mean square (RMS), integrated electromyography (IEMG), median frequency (MF), and mean power frequency (MPF). Spine morphology and surface EMG indexes before and after the intervention were compared among the four groups, and correlation analysis was used to explore the correlation between electronic spine measurements and surface EMG values before and after the exercise intervention. **Results** The results showed that Comparison of baseline age, BMI, type of column scoliosis, direction of scoliosis, site of scoliosis, degree of scoliosis, ATI, head deflection, shoulder height, hip height among the students in the 4 groups showed no statistically significant differences (P>0.05). The degree of scoliosis, ATI, head deflection, shoulder height of students in the combined group were lower than those in the control group after the intervention (P<0.05); compared with the pre-intervention period, the degree of scoliosis, ATI, head deflection, shoulder height, and hip height of the students in the SPS group, the PNF group, and the combined group were all lower after the intervention (P<0.05). The results of correlation analysis showed that ATI and RMSR before and after the intervention were positively correlated with the degree of scoliosis before and after the intervention (P<0.05); ATI after the intervention was positively correlated with head deflection, shoulder height, and hip height after the intervention (P<0.05); and RMSR after the intervention was positively correlated with head deflection and hip height after the intervention (P<0.05). The RMS and IEMG of the trapezius muscle on both sides were higher than those of the PNF group and those of the multifidus muscle on both sides were higher than those of the control group in the combined group after the intervention (P<0.05); compared with the pre-intervention period, the RMS and IEMG of the trapezius, erector spinae, and multifidus muscles on both sides were higher after the intervention in the students of the SPS group, the PNF group, and the combined group, and the overall RMS ratio (RMSR) was lower after the intervention (P<0.05). Compared with pre-intervention, SlopeMF was elevated in both trapezius, erector spinae, and multifidus muscles in the SPS group and combined group of students after intervention; and in both trapezius, erector spinae, and left multifidus muscles in the PNF group of students after intervention (P<0.05). Compared with the pre-intervention period, SlopeMPF of the trapezius, erector spinae, and left multifidus muscles on both sides were elevated after intervention for students in the SPS, PNF, and combined groups; SlopeMPF of the right multifidus muscle was elevated after intervention for students in the SPS and combined groups (P<0.05). Shoulder height after intervention was negatively correlated with the RMS of both trapezius and right multifidus muscles, the SlopeMPF of left trapezius, left erector spinae, and right multifidus muscles (P<0.05); hip height was negatively correlated with the RMS of both trapezius and both multifidus muscles, the SlopeMPF of the left trapezius muscle (P<0.05). **Conclusion** Our findings suggest that ATI, body balance, and surface EMG values improved significantly in all test groups (SPS, PNF, and combined groups) after treatment, with the combined group showing a particularly strong treatment effect in shoulder and hip balance, and fatigue resistance of the paravertebral muscles on both sides of the joint group after treatment. The PNF combined with the SPS intervention can benefit AIS students through the activation of more muscle fibers for exercise and improved muscle

fatigue.

【Key words】 Spinal curvatures；Adolescent idiopathic scoliosis；Stabilizing muscle chain training；Proprioceptive neuromuscular facilitation；Scoliosis-specific exercises；Randomized controlled trials

久坐不动的生活方式对姿势产生了影响，人体肌肉协调性的丧失和肌肉肌力的流失会引发一系列姿势异常的病症，例如脊柱侧弯。青少年特发性脊柱侧弯（adolescent idiopathic scoliosis，AIS）是一种复杂的三维畸形，其特征是侧向弯曲伴有椎体旋转。AIS表现出多种并发症和快速进展，在青少年人群中的检出率为10.99%[1]。大量临床试验已证明运动疗法在缓解AIS[2]、维持正常力线水平和预防脊柱侧弯发展的有效性。目前，我国常用的非手术治疗方法包括手法复位、支具疗法和运动疗法。MARUYAMA等[3]和NEGRINI等[4]建议将早期体育锻炼作为纠正或减缓脊柱侧弯进展的手段，并倡导将脊柱侧凸特异性运动疗法作为治疗脊柱弯曲异常的标准做法。这种干预方法要求治疗师具备精确的骨科知识和技能，以识别不同类型的弯曲并设计特定的训练动作。但是，此过程通常受到时间、空间和设备等限制的约束。

螺旋稳定肌肉链训练（spiral stabilizing muscle chain training，SPS）是一种基于神经生理学的训练方法，由Richard Smíšek先生创立，表明人体在体育活动中是作为一个综合的肌肉骨骼单元发挥作用。这包括脊柱的螺旋肌链（用于运动稳定）和垂直肌链（用于放松和稳定）[5]。SPS以遵守自然运动规律为基础，训练的重点是保持躯干的轴向姿势[6-8]，确保运动在所有脊柱节段和主要关节之间均匀分布。临床试验表明，螺旋稳定和垂直稳定交替纠正肌肉失衡，调动腹斜肌收紧腰围，调动颈腰段，拉长缩短的肌肉，加强无力的肌肉，创建肌肉链以稳定关节动作，根据基本原理激活腹部并放松椎旁肌肉[6]。因此，这减轻了椎间盘和关节的压力，同时为其提供再生和治疗的营养[7]。现有研究已经证实，SPS训练对脊柱侧弯治疗有显著贡献[6]，但仍需进一步的研究来验证其在治疗其他脊柱异常方面的有效性。

有节奏的起始和复制技术可用于运动矫正和自动矫正，而维持松弛和收缩松弛技术是治疗脊髓疼痛综合征和改善关节活动度的推荐疗法，有助于提高三维矫正稳定性[14-15]。本体感觉神经肌肉促进技术（proprioceptive neuromuscular facilitation，PNF）由20世纪40年代美国内科医生和神经生理学家Herman Kabat创立，在临床康复医学中逐渐得到认可。国内外研究表明，PNF的专业运动疗法可以对双重特发性脊柱侧弯学生的躯干旋转角度和脊柱旋转的灵活性产生立竿见影的效果。尽管如此，还需要进一步的科学研究来证实其长期疗效。与其他运动疗法相比，从事PNF相关活动的学生可以选择在医疗机构或家中进行。PNF的最终目标是在日常活动中实现最佳功能和最大独立性来改善每位学生的生活质量。

PNF和SPS已被定义为脊柱侧弯特异性矫正练习，但临床试验表明这两种干预方法在矫正区域和目标肌肉方面存在一定差异。此外，需要进一步比较分析主动力和被动阻力的有效性。以往研究在特定持续时间内将这两种方法分别应用于不同的年龄组，但尚未调查其综合效果。国内学者强调要利用不同技术的互补优势，最大限度地提高脊髓损伤学生的功能恢复能力[10]。因此，本研究以脊柱侧弯青少年学生为研究对象，旨在探讨PNF联合SPS干预矫正AIS的协同疗效。这些发现将为寻求家庭锻炼以预防AIS的青少年提供有价值的见解。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2024年1—3月筛查江苏省南京市中小学生1 060名，经研究指标二次筛选后纳入32名学生作为研究对象。根据先前受试者选取的脊柱形态学指标和表面肌电值，将学生随机均等分组为SPS组、PNF组、联合组和对照组。

纳入标准:（1)年龄10~18岁;（2)躯干旋转角(axial trunk rotation，ATR）为5° ≤ ATR<10° ；（3）没有支具或接受过手术，并且能够根据需要完成PNF治疗和SPS培训。排除标准：患有非特发性脊柱侧弯、任何运动相关禁忌证、脊柱手术史、任何先天性畸形、过去6个月内的任何外伤或任何伴随的神经、风湿病或精神问题。本研究经南京师范大学生物医学研究伦理委员会伦理审核通过（NNU202410016）。研究对象及监护人均知情同意。

研究使用Scoliometer脊柱侧弯测量尺开展筛查，脊柱侧弯判定标准参考《儿童青少年脊柱弯曲异常防控技术指南》[11]，详情见表1。

1.2 干预方法

运动干预器材主要包括SPS肌肉螺旋链弹力绳、软垫和支撑杆。学生在正式开始运动干预前，研究者对其开展为期2周的动作培训以便学生能够熟练完成训练，并促进部分肌群的发力。随后，4组学生开始为期12周的正式试验。试验每周进行3次训练（隔天进行），SPS组只采用SPS[12]（图1），PNF组只采用PNF[13]，联合组采用SPS联合PNF，对照组采用传统的核心稳定训练[14]。运动干预完成后，研究者采集学

生试验后的各项指标。通过软件处理分析后，与试验前测试数据对比分析得出试验结果。

表 1 脊柱侧弯结果判定
Table 1 Scoliosis results are determined.

脊柱侧弯判定类型	筛查结果	
身体平衡度	无异常	头部、肩部和髋部平衡度 0° ~1° （误差范围在 ±1.5° 以内）
	异常	头部、肩部和髋部平衡度 >1°
脊柱侧弯程度	侧弯Ⅰ度	身体平衡度异常或前屈试验 C7~L5 阳性或 ATR ≥ 5° 者，脊柱运动试验后进行躯干旋转测量仪检查，且 5° ≤ ATR<7°
	侧弯Ⅱ度	身体平衡度异常或前屈试验 C7~L5 阳性或 ATR ≥ 5° 者，脊柱运动试验后进行躯干旋转测量仪检查，且 7° ≤ ATR<10°
	侧弯Ⅲ度	身体平衡度异常或前屈试验 C7~L5 阳性或 ATR ≥ 5° 者，脊柱运动试验后进行躯干旋转测量仪检查，且 ATR ≥ 10°

注：ATR= 躯干旋转角。



图 1 AIS 学生开展 SPS 训练
Figure 1 SPS training for adolescent idiopathic scoliosis

1.3 试验指标

本研究试验结果指标分为脊柱形态学指标和原始表面肌电图采样。EK-8400 型电子脊柱测量仪能够测量 AIS 学生脊柱形态学指标，主要包括躯干倾斜角度（trunk inclination angle，ATI）和身体平衡度参数的测量，其中身体平衡度参数的测量有头部偏转度、肩部高低程度和骨盆高低程度。使用电子脊柱测量仪测量躯干旋转角度时，提示患者身体向前弯曲，保持肩关节与髋关节的连线与地面平行，并让患者双手合十自然下垂。将测量仪器放置在患者背部，分别记录胸椎、胸腰椎、腰椎和骶椎区域的最大角度。

肌电图指标主要包括 Sorensen 测试[15]和 12s 俯卧抗阻力测试中受试者 T6~T7 双侧斜方肌、L3~L4 双侧竖脊肌、L5~S1 双侧多裂肌的均方根肌电值（root mean square，RMS）、积分肌电值（integrated electromyography，IEMG）、中频（median frequency，MF）和平均功率频谱（mean power frequency，MPF），带通滤波 10~450 Hz。Sorensen 测试经过国外学者修改，将手臂位置更改为屈曲手臂，伸出肘部，双手放在颈背上，肩胛骨保持向后收缩状态，同时要求受试者的上半身保持在同一水平，确保腰背肌处于等长收缩状态。如果上半身无法维持水平，或者在提醒 3 次后仍显示上半身低于水平线，则停止测试。利用软件从该肌电数据中提取 MF 和 MPF 指标。12 s 俯卧背部阻力测试是让受试者俯卧于垫上，做最大力量的背部抬举动作，髋关节下方固定，研究者在肩胛骨上部给予阻力对抗，阻力大于受试者的最大力量，使椎旁肌肉做静态收缩，持续 12 s，用软件滤波整流后提取此肌电数据中 5 s 最大放电量的 RMS 值。

为了使不同条件下的肌肉活动水平具有可比性，需要将数据标准化，如公式（1）所示，即可得到时域指标 IEMG。利用斜率函数计算 MF 和 MPF 随时间变化的斜率，得到指标中频斜率（SlopeMF）和平均功率斜率（SlopeMPF）[16]，评估肌肉在持续活动中的疲劳情况。研究还采用凸凹侧椎旁肌 RMS 比值（root mean square ratio，RMSR）计算患者椎旁肌肉对称指数（paravertebral muscle symmetry index，PMSI）[17]，体现脊柱两侧肌肉效能的差异性和对称性[18]，并利用绘制箱线图及配对 t 检验法对试验前后 AIS 患者 RMSR 变化程度进行比较。计算公式：（1）$IEMG=RMS\times\Delta t$；（2）RMSR= 凸侧 RMS/ 凹侧 RMS；（3）$SlopeMF=\Delta MF/\Delta t$；（4）$SlopeMPF=\Delta MPF/\Delta t$，$\Delta MF$ 和 ΔMPF 是一段时间内 MF 和 MPF 的变化量，Δt 是相应的时间间隔。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 26.0 统计学软件对数据进行处理。使用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验，符合正态分布的计量资料以（$\bar{x}\pm s$）表示，多组间比较采用单因素方差分析 Bonferroni 法，组内干预前后比较采用配对 t 检验；偏态分布的计量资料以 M（P_{25}，P_{75}）表示，组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验，组内干预前后比较采用 Wilcoxon 符号秩检验；计数资料以名（%）表示，组间比较采用 χ^2 检验。采用 Mantel Test 分析评估 ATI、RMSR 与其他脊柱形态学指标间的相关性，采用 Pearson 相关性分析探讨运动干预前后脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 受试者基线资料比较

2024 年 1—3 月筛查 1 060 名中小学生，985 名不符合纳入标准，35 名不愿参加本次试验，8 名未完成 12 周治疗，最终共纳入 32 名 AIS 学生作为研究对象，SPS 组、PNF 组、联合组和对照组各 8 名学生（图 2）。

32 名 AIS 学生中女 17 名（53.1%）、男 15 名（16.9%），平均年龄为（13.9±0.8）岁，平均 BMI 为（19.1±2.3）kg/m^2；平均 ATI 为（6.8°±2.1°），头部偏转度为（2.4°±1.4°），肩部高低程度为（2.1°±1.3°），臀部高低程度为（1.7°±0.8°）；脊柱侧弯类型为 C 型脊柱侧弯 19 名（59.4%）、S 型脊柱侧弯 13 名（40.6%），脊柱侧弯方向为左侧侧弯 26 名（81.2%）、右侧侧弯 16 名（50.0%），脊柱侧弯部位为胸部侧弯 16 名（50.0%）、腰部侧弯 28 名（87.5%）。4 组学生年龄、BMI、脊柱侧弯类型、脊柱侧弯方向、脊柱侧弯部位比较，差异均无统计学意义（P>0.05），见表 2。

2.2 12 周运动干预对 AIS 学生脊柱形态学指标的影响

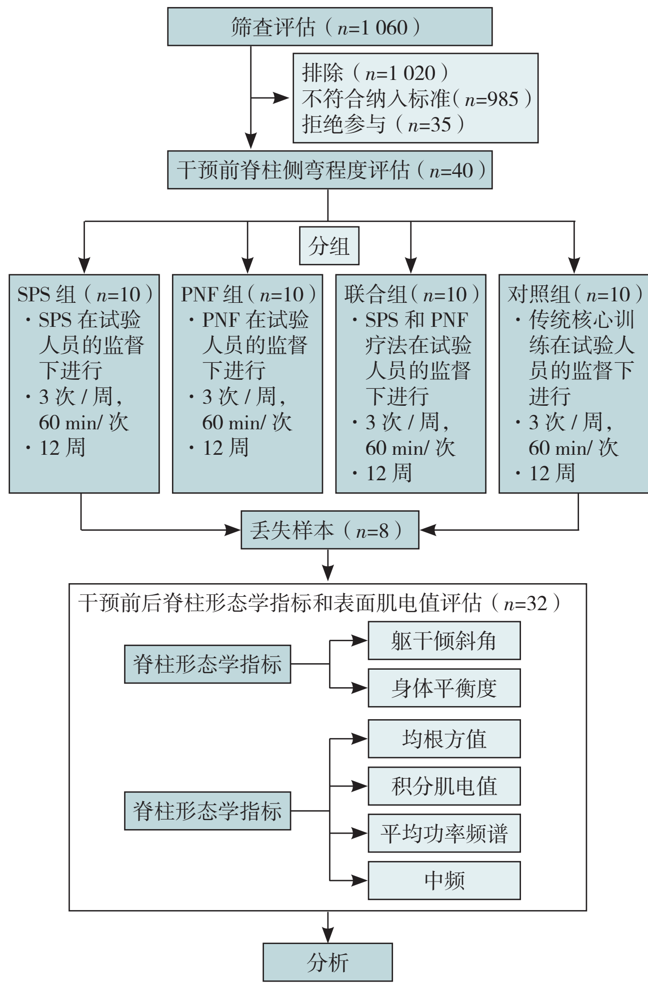
4 组学生干预前脊柱形态学指标组间比较，差异均无统计学意义（P>0.05）。4 组学生干预后脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度组间比较，差异均有统计学意义（P<0.05）；其中联合组学生脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度均低于对照组，SPS 组、PNF 组、联合组学生臀部高低程度均低于对照组，差异有统计学意义（P<0.05），见表 3。

与干预前相比，SPS 组、PNF 组、联合组学生干预后脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度均降低，对照组学生干预后 ATI 升高，差异有统计学意义（P<0.05）；对照组学生干预前后头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度比较，差异无统计学意义（P>0.05），见表 3。

2.3 干预前后脊柱形态学指标的相关性分析

干预前脊柱侧弯程度与干预后脊柱侧弯程度呈正相关（P<0.05），干预前头部偏转度与干预后头部偏转度呈正相关（P<0.05），干预前肩部高低程度与干预后肩部高低程度呈正相关（P<0.05），干预前臀部高低程度与干预后肩部高低程度、臀部高低程度呈正相关（P<0.05），干预后脊柱侧弯程度与干预后头部偏转度、肩部高低程度呈正相关（P<0.05），干预后头部偏转度与干预后肩部高低程度、臀部高低程度呈正相关（P<0.05），干预后肩部高低程度与臀部高低程度呈正相关（P<0.05），见表 4。

使用 Mantel Test 分析比较干预前后 ATI 与脊柱侧弯程度和身体平衡度的相关性，以及 RMSR 与脊柱侧弯程



注：PNF=本体感觉神经肌肉促进技术，SPS=螺旋稳定肌肉链训练。

图 2 PNF 联合 SPS 治疗 AIS 的流程图

Figure 2 Flowchart of SPS training and PNF technique for the treatment of AIS

表 2 4 组学生基线资料比较 4 组学生基线资料比较

Table 2 Baseline data of the four groups were compared

组别	例数	年龄（岁）	BMI（kg/m^2）	脊柱侧弯类型［名（%）］		脊柱侧弯方向［名（%）］		脊柱侧弯部位［名（%）］	
				C 型侧弯	S 型侧弯	左侧侧弯	右侧侧弯	胸部侧弯	腰部侧弯
SPS 组	8	13.88±0.84	19.33±2.72	6/8	2/8	6/8	3/8	2/8	7/8
PNF 组	8	13.50±0.54	18.93±2.27	4/8	4/8	7/8	5/8	5/8	7/8
联合组	8	14.25±0.71	18.52±2.41	4/8	4/8	8/8	4/8	6/8	6/8
对照组	8	14.13±0.99	19.83±1.96	5/8	3/8	5/8	4/8	3/8	8/8
χ^2（F）值		1.420[a]	0.444[a]	1.523	1.523	3.840	1.126	4.791	2.271
P 值		0.258	0.723	0.858	0.858	0.440	0.960	0.233	0.886

注：PNF=本体感觉神经肌肉促进技术，SPS=螺旋稳定肌肉链训练；[a] 为 F 值。

度和身体平衡度的相关性，结果显示，干预前后 ATI、RMSR 与干预前后脊柱侧弯程度均呈正相关（$P<0.05$）；干预后 ATI 与干预后头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度呈正相关（$P<0.05$）；干预后 RMSR 与干预后头部偏转度、臀部高低程度呈正相关（$P<0.05$），见表 5。

2.4 12 周运动干预对 AIS 学生表面肌电图生物反馈的影响

2.4.1 12 周运动干预对 AIS 学生 RMS 的影响：4 组学生干预前两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的 RMS 比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。4 组学生干预后两侧斜方肌、多裂肌的 RMS 比较，差异均有统计学意义（$P<0.05$）；其中联合组学生两侧斜方肌的 RMS 高于 PNF 组，两侧多裂肌的 RMS 高于对照组，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 6。

与干预前相比，SPS 组、PNF 组、联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的 RMS 均升高，差异有统计学意义（$P<0.05$）；对照组干预前后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的 RMS 比较，差异无统计学意义（$P>0.05$），见表 6。

总体上，4 组学生干预前、后 RMSR 比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。与干预前相比，SPS 组、PNF 组和联合组学生干预后 RMSR 均降低，差异有统计学意义（$P<0.05$）；对照组学生干预前后 RMSR 比较，差异无统计学意义（$P>0.05$），见表 7。

2.4.2 12 周运动干预对 AIS 学生 IEMG 的影响：4 组学生干预前两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的 IEMG 比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。4 组学生干预后两侧斜方肌、多裂肌的 IEMG 比较，差异均有统计学意义（$P<0.05$）；其中联合组学生两侧斜方肌的 IEMG 高于 PNF 组，两侧多裂肌的 IEMG 高于对照组，差异有统计

表 3 12 周运动干预对 AIS 学生脊柱形态学指标的影响

Table 3 Effect of 12-week exercise intervention on spinal morphological markers in AIS students

组别	人数	脊柱侧弯程度				ATI			
		干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值
SPS 组	8	1.4° ± 0.7°	1.0° ± 1.1°	2.049	0.080	6.4° ± 2.1°	5.2° ± 1.8°	9.000	<0.001
PNF 组	8	1.9° ± 1.0°	0.8° ± 0.9°	9.000	<0.001	7.5° ± 2.2°	5.6° ± 2.1°	15.000	<0.001
联合组	8	1.8° ± 0.9°	0.4° ± 0.5°	7.514	<0.001	6.9° ± 2.1°	4.0° ± 1.2°	6.524	<0.001
对照组	8	1.6° ± 0.7°	1.9° ± 0.8°[c]	-1.000	0.351	6.6° ± 1.9°	7.6° ± 1.9°[c]	-2.646	0.033
F 值		0.507	4.494			0.419	5.549		
P 值		0.680	0.011			0.741	0.004		

组别	头部偏转度				肩部高低程度				臀部高低程度			
	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值
SPS 组	2.2° ± 1.0°	1.6° ± 0.7°	3.416	0.011	2.6° ± 1.2°	1.4° ± 0.7°	5.000	0.002	1.8° ± 1.0°	0.9° ± 0.6°	2.966	0.021
PNF 组	2.1° ± 0.6°	1.3° ± 0.7°	7.000	<0.001	2.1° ± 1.7°	1.3° ± 1.2°	2.966	0.021	2.1° ± 0.6°	1.0° ± 0.9°	3.813	0.007
联合组	3.0° ± 2.4°	0.9° ± 1.0°	3.871	0.006	1.6° ± 0.9°	0.3° ± 0.5°	4.245	0.004	1.1° ± 0.6°	0.4° ± 0.5°	4.583	0.003
对照组	2.3° ± 0.7°	2.4° ± 1.1°[c]	-0.284	0.785	1.9° ± 1.1°	2.6° ± 1.5°[c]	-1.821	0.111	2.0° ± 0.8°	2.4° ± 0.7°[abc]	-1.000	0.351
F 值	0.321	4.153			0.897	8.80			2.57	11.228		
P 值	0.810	0.015			0.455	0.001			0.074	<0.001		

注：ATI= 躯干倾斜角度；[a] 表示与 SPS 组比较 $P<0.05$，[b] 表示与 PNF 组比较 $P<0.05$，[c] 表示与联合组比较 $P<0.05$。

表 4 干预前后脊柱侧弯程度与身体平衡度的相关性（r 值）

Table 4 Correlation between the degree of scoliosis and body balance before and after intervention

指标	干预前脊柱侧弯程度	干预前头部偏转度	干预前肩部高低程度	干预前臀部高低程度	干预后脊柱侧弯程度	干预后头部偏转度	干预后肩部高低程度	干预后臀部高低程度
干预前脊柱侧弯程度	1.000							
干预前头部偏转度	0.242	1.000						
干预前肩部高低程度	-0.225	-0.034	1.000					
干预前臀部高低程度	0.012	-0.161	0.317	1.000				
干预后脊柱侧弯程度	0.591[a]	-0.082	-0.161	0.073	1.000			
干预后头部偏转度	0.113	0.442[a]	0.220	0.121	0.386[a]	1.000		
干预后肩部高低程度	0.028	-0.065	0.545[a]	0.436[a]	0.417[a]	0.550[a]	1.000	
干预后臀部高低程度	-0.228	-0.249	0.143	0.456[a]	0.299	0.459[a]	0.547[a]	1.000

注：[a] 表示 $P<0.05$。

表5 干预前后RMSR、ATI与其他脊柱形态学指标的Mantel Test分析（r值）

Table 5 Mantel test analysis of RMSR，ATI and spine morphological indexes before and after intervention

指标	干预前ATI	干预前RMSR	干预后ATI	干预后RMSR
干预前脊柱侧弯程度	0.927[a]	0.450[a]	0.349[a]	0.027[a]
干预前头部偏转度	0.065	–0.037	–0.037	–0.010
干预前肩部高低程度	–0.029	–0.078	–0.097	–0.094
干预前臀部高低程度	–0.074	–0.061	–0.005	0.053
干预后脊柱侧弯程度	0.331[a]	0.174[a]	0.789[a]	0.322[a]
干预后头部偏转度	0.000	–0.011	0.158[a]	0.288[a]
干预后肩部高低程度	–0.050	–0.065	0.119[a]	0.132
干预后臀部高低程度	–0.077	0.083	0.180[a]	0.216[a]

注：[a]表示 $P<0.05$。

学意义（$P<0.05$），见表8。

与干预前相比，SPS组、PNF组、联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的IEMG均升高，差异有统计学意义（$P<0.05$）；对照组干预前后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的IEMG比较，差异无统计学意义（$P>0.05$），见表8。

2.4.3 12周运动干预对AIS学生SlopeMF的影响：4组学生干预前、后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的SlopeMF比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。与干预前相比，SPS组和联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的SlopeMF均升高（$P<0.05$）；PNF组学生干预后两侧斜方肌、两侧竖脊肌、左侧多裂肌的SlopeMF均升高，差异有统计学意义（$P<0.05$）。

表6 12周运动干预对AIS学生RMS的影响（mV）

Table 6 Effect of 12-week exercise intervention on RMS in AIS students

组别	人数	左侧斜方肌				左侧竖脊肌				左侧多裂肌			
		干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值
SPS组	8	0.039±0.016	0.048±0.016	–2.540	0.039	0.04±0.016	0.049±0.02	–2.977	0.021	0.021±0.01	0.029±0.013	–4.766	0.002
PNF组	8	0.033±0.015	0.039±0.013	–2.456	0.044	0.032±0.01	0.038±0.009	–3.985	0.005	0.023±0.012	0.029±0.012	–3.083	0.018
联合组	8	0.053±0.015	0.064±0.014[a]	–6.464	<0.001	0.028±0.008	0.040±0.011	–5.640	0.001	0.026±0.008	0.038±0.012	–2.935	0.022
对照组	8	0.049±0.032	0.045±0.025	1.561	0.162	0.028±0.018	0.032±0.022	–1.244	0.254	0.018±0.012	0.019±0.013[b]	–0.798	0.451
F值		2.310	3.054			1.321	1.464			0.927	3.131		
P值		0.117	0.045			0.287	0.246			0.440	0.041		

组别	右侧斜方肌				右侧竖脊肌				右侧多裂肌			
	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值
SPS组	0.038±0.017	0.047±0.016	–4.117	0.004	0.032±0.015	0.037±0.015	–4.977	0.002	0.020±0.010	0.027±0.014	–2.952	0.021
PNF组	0.033±0.011	0.038±0.013	–3.779	0.007	0.028±0.008	0.035±0.009	–3.593	0.009	0.019±0.014	0.026±0.015	–4.623	0.002
联合组	0.051±0.014	0.064±0.013[a]	–4.554	0.003	0.024±0.015	0.041±0.023	–4.23	0.004	0.026±0.009	0.041±0.013	–3.744	0.007
对照组	0.046±0.033	0.044±0.024	0.383	0.713	0.029±0.021	0.033±0.022	–1.987	0.087	0.019±0.011	0.018±0.009[b]	0.699	0.507
F值	1.273	3.29			0.359	0.239			0.701	4.342		
P值	0.303	0.035			0.783	0.868			0.559	0.012		

注：RMS=均方根肌电值；[a]表示与PNF组比较 $P<0.05$，[b]表示与联合组比较 $P<0.05$。

表7 12周运动干预对AIS学生RMSR的影响

Table 7 Effect of 12-week exercise intervention on RMSR in AIS students

项目	人数	RMSR			
		干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值
SPS组	8	1.667±0.651	1.143±0.219	3.134	0.017
PNF组	8	1.880±0.969	1.045±0.098	2.574	0.037
联合组	8	1.628±0.669	1.000±0.111	2.710	0.030
对照组	8	1.592±0.650	1.342±0.614	1.355	0.218
F值		0.239	1.456		
P值		0.869	0.268		

注：RMSR=均方根肌电值比值。

对照组学生干预前后两侧斜方肌、竖脊肌、多裂肌的SlopeMF比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）；PNF组学生干预前后右侧多裂肌的SlopeMF比较，差异无统计学意义（$P>0.05$），见表9。

2.4.4 12周运动干预对AIS学生SlopeMPF的影响：4组学生干预前、后两侧斜方肌、竖脊肌、左侧多裂肌的SlopeMPF比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$）；4组学生干预前右侧多裂肌的SlopeMPF比较，差异无统计学意义（$P>0.05$），干预后右侧多裂肌的SlopeMPF比较，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表10。

与干预前相比，SPS组、PNF组、联合组学生干预后两侧斜方肌、竖脊肌、左侧多裂肌的SlopeMPF均升高；SPS组、联合组学生干预后右侧多裂肌的SlopeMPF均升高，差异有统计学意义（$P<0.05$）。对照组学生干预前后两侧斜方肌、多裂肌、竖脊肌的SlopeMPF比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）；PNF组学生干预前后右侧多裂肌的SlopeMPF比较，差异无统计学意义

（P>0.05），见表 10。

2.5 脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性分析

2.5.1 干预前脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性：干预前脊柱侧弯程度、ATI 与 RMSR 呈正相关（P<0.05）；头部偏转度与右侧竖脊肌 RMS 呈负相关（P<0.05）；臀部高低程度与两侧斜方肌 SlopeMPF 呈正相关（P<0.05），臀部高低程度与右侧多裂肌 SlopeMF 呈正相关（P<0.05），见表 11。

2.5.2 干预后脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性：干预后脊柱侧弯程度、ATI 与 RMSR 呈正相关

表 8 12 周运动干预对 AIS 学生 IEMG 的影响（$\times 10^{-3}$ μV·s）

Table 8 Effect of 12-week exercise intervention on IEMG in AIS students

组别	人数	左侧斜方肌				左侧竖脊肌				左侧多裂肌			
		干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值
SPS 组	8	0.400±0.165	0.495±0.161	-2.54	0.039	0.416±0.183	0.506±0.206	-6.763	<0.001	0.218±0.101	0.298±0.138	-4.766	0.002
PNF 组	8	0.343±0.154	0.399±0.137	-2.456	0.044	0.300±0.091	0.455±0.099	-4.605	0.002	0.242±0.124	0.295±0.123	-2.844	0.025
联合组	8	0.543±0.154	0.665±0.149[a]	-6.464	<0.001	0.331±0.094	0.411±0.116	-3.049	0.019	0.272±0.083	0.387±0.119	-2.935	0.022
对照组	8	0.503±0.329	0.462±0.263	1.561	0.162	0.293±0.191	0.331±0.231	-1.244	0.254	0.184±0.125	0.192±0.129[b]	-0.798	0.451
F值		2.310	3.054			1.174	1.486			0.928	3.140		
P值		0.117	0.045			0.337	0.240			0.440	0.041		

组别	右侧斜方肌				右侧竖脊肌				右侧多裂肌			
	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P值
SPS 组	0.394±0.180	0.487±0.166	-4.117	0.004	0.319±0.128	0.386±0.154	-5.579	0.001	0.206±0.103	0.274±0.140	-2.952	0.021
PNF 组	0.336±0.111	0.396±0.132	-3.779	0.007	0.258±0.097	0.386±0.122	-3.938	0.006	0.202±0.143	0.263±0.153	-4.438	0.003
联合组	0.531±0.143	0.658±0.130[a]	-4.554	0.003	0.291±0.137	0.419±0.243	-3.165	0.016	0.267±0.088	0.421±0.131	-3.744	0.007
对照组	0.470±0.345	0.453±0.248	0.383	0.713	0.303±0.221	0.345±0.223	-1.987	0.087	0.196±0.113	0.189±0.098[b]	0.699	0.507
F值	1.273	3.290			0.227	0.202			0.691	4.342		
P值	0.303	0.035			0.877	0.894			0.565	0.012		

注：[a] 表示与 PNF 组比较 P<0.05，[b] 表示与联合组比较 P<0.05。

表 9 12 周运动干预对 AIS 学生 SlopeMF 的影响（Hz/s）

Table 9 Effect of 12-week exercise intervention on SlopeMF in AIS students

组别	人数	左侧斜方肌				左侧竖脊肌				左侧多裂肌			
		干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值
SPS 组	8	-0.012（-0.016，-0.005）	-0.009（-0.012，-0.003）	-2.100	0.036	-0.016（-0.021，-0.003）	-0.008（-0.015，-0.001）	-2.240	0.025	-0.005（-0.010，-0.002）	-0.004（-0.008，-0.001）	-2.521	0.012
PNF 组	8	-0.006（-0.017，-0.003）	-0.004（-0.009，-0.002）	-2.521	0.012	-0.008（-0.012，-0.004）	-0.004（-0.007，-0.003）	-2.521	0.012	-0.008（-0.019，-0.005）	-0.008（-0.015，-0.004）	-2.521	0.012
联合组	8	-0.004（-0.005，-0.003）	-0.003（-0.005，-0.001）	-2.521	0.012	-0.013（-0.014，-0.006）	-0.006（-0.009，-0.003）	-2.521	0.012	-0.018（-0.028，-0.013）	-0.007（-0.015，-0.002）	-2.521	0.012
对照组	8	-0.005（-0.006，-0.002）	-0.001（-0.005，0.001）	-1.400	0.161	-0.007（-0.017，-0.004）	-0.006（-0.020，-0.003）	-1.540	0.123	-0.006（-0.007，-0.002）	-0.006（-0.007，-0.002）	-1.069	0.285
H值		5.139	5.875			1.168	0.923			7.621	2.321		
P值		0.162	0.118			0.761	0.820			0.054	0.509		

组别	右侧斜方肌				右侧竖脊肌				右侧多裂肌			
	干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值	干预前	干预后	$Z_{配对}$值	P值
SPS 组	-0.012（-0.016,-0.003）	-0.009（-0.011,-0.002）	-2.521	0.012	-0.005（-0.006,-0.004）	-0.003（-0.005,-0.002）	-2.521	0.012	-0.007（-0.009,-0.006）	-0.005（-0.008,-0.002）	-2.521	0.012
PNF 组	-0.005（-0.009,-0.003）	-0.004（-0.009,-0.002）	-2.521	0.012	-0.006（-0.009,-0.004）	-0.004（-0.006,-0.003）	-2.521	0.012	-0.008（-0.018,-0.004）	-0.006（-0.021,-0.002）	-1.540	0.123
联合组	-0.004（-0.005,-0.003）	-0.003（-0.005,-0.002）	-2.380	0.017	-0.010（-0.016,-0.006）	-0.003（-0.010,-0.002）	-2.521	0.012	-0.015（-0.030,-0.004）	-0.003（-0.009,-0.002）	-2.521	0.012
对照组	-0.008（-0.011,-0.002）	-0.003（-0.008,0.009）	-1.572	0.116	-0.003（-0.006,-0.002）	-0.003（-0.006,-0.002）	-1.753	0.080	-0.006（-0.026,-0.003）	-0.007（-0.026,-0.001）	-1.095	0.273
H值	4.116	3.094			7.750	1.372			0.844	1.256		
P值	0.249	0.377			0.051	0.712			0.839	0.740		

表 10 12 周运动干预对 AIS 学生 SlopeMPF 的影响（Hz/s）
Table 10 Effect of 12-week Exercise Intervention on SlopeMPF in AIS Students

组别	人数	左侧斜方肌				左侧竖脊肌				左侧多裂肌			
		干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值
SPS 组	8	-0.050±0.030	-0.039±0.025	-2.69	0.031	-0.288±0.123	-0.217±0.135	-3.044	0.019	-0.181±0.132	-0.046±0.041	-2.553	0.038
PNF 组	8	-0.034±0.024	-0.025±0.019	-3.83	0.006	-0.243±0.05	-0.166±0.046	-3.283	0.067	-0.188±0.098	-0.098±0.07	-6.28	0.000
联合组	8	-0.051±0.025	-0.041±0.018	-3.067	0.018	-0.272±0.152	-0.150±0.063	-3.115	0.017	-0.204±0.102	-0.112±0.081	-3.414	0.011
对照组	8	-0.055±0.039	-0.111±0.094	1.863	0.105	-0.295±0.2	-0.237±0.156	-2.658	0.033	-0.190±0.154	-0.196±0.17	0.287	0.783
F 值		0.778	2.670			0.207	1.110			0.049	3.241		
P 值		0.516	0.085			0.891	0.362			0.986	0.053		

组别	右侧斜方肌				右侧竖脊肌				右侧多裂肌			
	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值	干预前	干预后	$t_{配对}$值	P 值
SPS 组	-0.045±0.032	-0.036±0.029	-3.828	0.006	-0.202±0.074	-0.086±0.048	-3.784	0.007	-0.209±0.14	-0.045±0.033	-2.790	0.027
PNF 组	-0.036±0.017	-0.026±0.014	-3.857	0.006	-0.176±0.088	-0.134±0.071	-2.908	0.042	-0.153±0.079	-0.125±0.046	-1.669	0.139
联合组	-0.056±0.026	-0.037±0.018	-4.109	0.005	-0.183±0.115	-0.115±0.066	-2.467	0.043	-0.184±0.105	-0.092±0.072	-4.233	0.004
对照组	-0.038±0.038	-0.054±0.055	0.861	0.418	-0.209±0.174	-0.178±0.121	-1.073	0.319	-0.232±0.266	-0.164±0.185	-2.03	0.082
F 值	0.732	1.068			0.133	1.816			0.459	5.568		
P 值	0.542	0.393			0.940	0.167			0.715	0.010		

（P<0.05）；头部偏转度与左侧竖脊肌 SlopeMF、右侧多裂肌 RMS 呈负相关（P<0.05）；肩部高低程度与两侧斜方肌、右侧多裂肌 RMS，左侧斜方肌、左侧竖脊肌 SlopeMPF，右侧多裂肌 SlopeMF 呈负相关（P<0.05）；臀部高低程度与两侧斜方肌、两侧多裂肌 RMS，左侧斜方肌 SlopeMPF 呈负相关（P<0.05），见表 12。

3 讨论

3.1 SPS 训练对 AIS 的影响

在学生缺乏运动或进行不正确的坐姿时会导致螺旋链出现障碍，肌肉募集程度较低。久坐、固定姿势、头前伸、骨盆前倾等问题也伴随着螺旋链的失活，身体出现慢性劳损，出现脊柱侧弯等脊柱健康问题。近年来，SPS 理论对健身康复有显著效果，得到了国际上的高度认可。SPS 通过激活人体自身的肌肉链，调节垂直链和螺旋链的肌肉平衡，纠正学生的神经系统异常，重建人体的神经肌肉连接并纠正学生的神经系统异常。

本研究通过设立 SPS 组开展为期 12 周的运动干预试验，结果显示试验前后学生 ATI 指标显著降低（P<0.001），说明 SPS 治疗脊柱侧弯的效果较好，脊柱倾斜度有所改善，与既往研究结果相似[19]。与其他部位相比，SPS 可以提高机体不对称的肌肉力量，对平衡肩部高度有很好的效果。研究显示，腰腹部肌肉疼痛引发的反射性肌肉抑制和长期的腰椎活动受限，会导致竖脊肌的力量不足，从而引发不同程度的废用性萎缩[20-21]，并导致核心肌群力量的下降。肌力的下降进一步干扰了运动控制能力和本体感觉信息的录入，造成运动负担[21]。对比分析运动干预前后学生

表 11 干预前脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性（r 值）
Table 11 Correlation between spinal morphological indexes and surface electromyography values before intervention

项目	脊柱侧弯程度	ATI	头部偏转度	肩部高低程度	臀部高低程度
RMSR	0.483[a]	0.485[a]	-0.173	0.005	0.092
左侧斜方肌					
RMS	-0.038	-0.094	0.077	-0.281	-0.233
SlopeMF	0.265	0.276	0.033	-0.041	-0.123
SlopeMPF	-0.040	-0.082	0.024	0.264	0.423[a]
右侧斜方肌					
RMS	-0.098	-0.162	0.065	-0.230	-0.341
SlopeMF	0.171	0.213	0.085	-0.158	-0.052
SlopeMPF	-0.015	-0.015	0.132	0.269	0.515[b]
左侧竖脊肌					
RMS	-0.064	-0.075	-0.279	0.223	0.235
SlopeMF	-0.071	-0.086	0.184	0.128	0.346
SlopeMPF	-0.005	0.010	0.190	0.053	0.131
右侧竖脊肌					
RMS	-0.241	-0.244	-0.401[a]	-0.023	-0.052
SlopeMF	-0.184	-0.165	0.216	0.096	0.003
SlopeMPF	0.015	0.016	0.197	0.235	0.024
左侧多裂肌					
RMS	-0.164	-0.177	-0.083	-0.114	-0.129
SlopeMF	0.080	0.131	0.120	-0.159	-0.037
SlopeMPF	-0.124	-0.095	0.127	-0.071	0.332
右侧多裂肌					
RMS	0.155	0.157	0.022	-0.234	-0.116
SlopeMF	-0.068	-0.087	0.220	0.087	0.359[a]
SlopeMPF	0.205	0.217	0.289	-0.082	0.001

注：SlopeMF= 中频斜率，SlopeMPF= 平均功率斜率；[a] 表示 P<0.05。

表 12 干预后脊柱形态学指标与表面肌电图值的相关性（r 值）

Table 12 Correlation between spinal morphological indexes and surface electromyography values after intervention

项目	脊柱侧弯程度	ATI	头部偏转度	肩部高低程度	臀部高低程度
RMSR	0.562[a]	0.516[a]	0.211	0.216	0.340
左侧斜方肌					
RMS	0.002	-0.095	-0.097	-0.370[a]	-0.400[a]
SlopeMF	0.257	0.256	0.037	-0.065	0.049
SlopeMPF	-0.224	-0.212	-0.279	-0.527[a]	-0.372[a]
右侧斜方肌					
RMS	-0.109	-0.216	-0.186	-0.402[a]	-0.380[a]
SlopeMF	0.242	0.329	0.192	0.253	0.332
SlopeMPF	-0.320	-0.232	-0.200	-0.166	-0.209
左侧竖脊肌					
RMS	-0.034	-0.062	-0.147	0.066	-0.151
SlopeMF	-0.179	-0.234	-0.351[a]	-0.281	0.173
SlopeMPF	-0.233	-0.154	-0.089	-0.388[a]	-0.050
右侧竖脊肌					
RMS	-0.070	-0.125	-0.260	-0.062	-0.035
SlopeMF	-0.066	-0.127	0.288	0.067	0.045
SlopeMPF	-0.184	-0.223	-0.096	-0.308	-0.181
左侧多裂肌					
RMS	-0.237	-0.268	-0.324	-0.346	-0.364[a]
SlopeMF	-0.032	-0.036	-0.104	-0.262	-0.177
SlopeMPF	-0.243	-0.285	-0.034	-0.333	-0.150
右侧多裂肌					
RMS	-0.211	-0.240	-0.385[a]	-0.378[a]	-0.361[a]
SlopeMF	-0.087	-0.147	-0.156	-0.411[a]	-0.181
SlopeMPF	-0.141	-0.208	0.070	-0.277	-0.178

注：[a] 表示 $P<0.05$。

SlopeMF 和 SlopeMPF 的差异性，SPS 对学生两侧椎旁肌的 SlopeMPF 指标有明显升高的效果。原因在于 SPS 的模式能增强凹侧肌肉的肌力，借助肌肉链收缩产生向上的牵引力牵伸脊柱，缓解部分患者因久坐引起的下腰疼痛[20，22]。由于每一位患者的症状除了试验采集的身体姿态异常以外，还存在部分小细节的不同。后续研究可以进一步探索 SPS 的对脊柱侧弯的具体生理机制，关注制订个性化运动干预方案，了解干预后复发的风险及其预防策略。

3.2 PNF 技术对 AIS 的影响

当维持脊柱稳定的神经肌肉出现异常时，会破坏其支撑稳定的各个系统，易出现平衡异常和肌纤维的改变，导致脊柱生理性弯曲变为病理性弯曲，部分肌肉疲劳和骨骼疼痛[19]。研究表明，PNF 技术的整个过程属于多关节、多肌群的整体运动。通过治疗师的触碰、语言、密码和视觉引导，PNF 技术旨在影响和塑造学生的正确运动模式，激活并诱导更多的运动肌纤维参与活动。该方法提倡使用对角线型运动促进身体两侧的相互协作，实现运动后肌肉的放松和伸展，从而减少新陈代谢和耗氧量[9]，以旋转促进脊柱三维活动度[23]，达到缓解运动障碍的疗效[24]。

12 周的运动干预试验结果显示，PNF 技术治疗 AIS 的疗效较好，对学生脊柱侧弯程度、ATI、头部偏转度、臀部高低程度有显著的降低作用（$P<0.01$）。PNF 技术对增强患者机体本体感受器和体位信息感觉的恢复优于 SPS 训练，缓解斜方肌和多裂肌的紧张，对竖脊肌肌力的激活和提高肌肉活性的效用更高，进一步证实了 PNF 技术能够改善患者肩关节和髋关节的活动范围和柔韧性，减轻疼痛[25]，达到缓解运动障碍的疗效[24]。既往研究结果显示，PNF 技术能利用本体感受器和肌肉牵张反射，提升肌肉力量、灵活性和协调性[26]，有助于肌肉快速恢复，提高肌肉的抗疲劳能力。本研究深入分析了患者椎旁肌在一定时间内的疲劳程度，结果显示 PNF 技术可提高患者背部肌群的动态负荷水平，对斜方肌和竖脊肌的 SlopeMF 和 SlopeMPF 有升高作用，与既往研究结果相同，建议加强对接受运动干预患者的长期随访研究，以评估治疗效果的持久性和对脊柱结构、功能的长期影响。

3.3 PNF 技术联合 SPS 训练对 AIS 的影响

目前，综合康复治疗模式逐渐受到公众关注。覃彪民等[27]将 PNF 与传统针刺疗法结合，应用于特发性面神经麻痹患者的治疗，发现联合疗法能够使患者恢复速度加快，疗效更好。梁斌等[23]采用 PNF 联合高压氧治疗脊髓损伤合并不完全性截瘫患者 48 例，康复治疗 6 个月后发现患者感觉、动作评分及改良巴氏指数显著提高，疗效明显优于常规康复治疗方法。

本研究联合组采用 PNF 联合 SPS 的康复疗法，在开展正式试验之前，学生需要在治疗师的指导下进行 2 周的运动学习和肌肉力量模拟，才能在试验中取得更好的效果。本研究初步探索联合疗法治疗 AIS 的临床效果，结果显示试验前后学生脊柱形态学指标有显著的改善效果（$P<0.01$），对学生脊柱侧弯程度和 ATI 的疗效最好（$P<0.001$），提示运动干预能够延缓脊柱侧弯的进展，改善侧弯程度，调控肌平衡[19]。董佳兴等[18]通过使用远程康复联合门诊治疗 AIS，发现联合疗法能够改善脊柱的矢状位和旋转异常，提升顶椎椎旁肌的激活率，增强双侧椎旁肌的平衡性，本研究结果与之一致。由于联合疗法综合了两种康复方式的优点，椎旁肌肌力和肌肉耐力明显高于其他试验组，SlopeMPF 均得到了不同程度的升高，显著改善了背伸肌的耐力，激活了肌肉链中的核心部位肌群。

3.4 脊柱形态学指标与表面肌电图值相关性的主要发现

整体上干预前 ATI 和 RMSR 与脊柱侧弯程度之间存在显著的强正相关关系，表明在干预前，脊柱侧弯程度对其他相关指标有显著影响。虽然干预后 ATI 和 RMSR 与脊柱侧弯程度仍显示出相关性，但较之于干预前，其相关性有所减弱，这可能是由于干预实施后脊柱侧弯程度的数值减少和基线值的普遍降低所致。此外，个体的肌肉力量和运动状态等潜在变量也可能影响关系的稳定性和强度。干预前后 ATI 和 RMSR 与干预前身体平衡度指标未见显著相关性。然而，干预后头部偏转度、肩部高低程度、臀部高低程度与干预后 ATI 均呈正相关，同时头部偏转度、臀部高低程度与干预后 RMSR 均呈正相关（$P<0.05$）。这些结果强调了干预措施对脊柱侧弯及相关指标的影响，建议进一步深入探讨脊柱侧弯程度与不同身体指标之间的关系。试验分析结果表明脊柱侧弯程度在干预前对其他指标有显著的影响。相较于干预前脊柱侧弯程度有所减弱，原因可能在于随着干预的实施，脊柱侧弯程度的数值减少、基线值的普遍降低和变量间的线性关系变化可能导致与 ATI、RMSR 之间的相关性减弱。且其他潜在变量的影响，如个体肌肉力量、运动状态等，均可能影响交互作用的稳定性和强度。

4 结论

综上，PNF 联合 SPS 能够有效的改善 AIS 的进展，对患者椎旁肌肌力有较好的增强效果，能够进一步修复左右两侧椎旁肌的不对称性。本研究在康复治疗手段方面是具有一点的创新性，探究新型联合康复手法对 AIS 的治疗效果。SPS 能由于放松和牵拉椎旁肌，其整体治疗效果均优于核心稳定训练，促进肌张力的恢复[28]，提高了肌肉激活水平，已得到了先前研究的充分认证[29-30]。PNF 通过等长收缩、向心收缩和离心收缩等多种运动模式，缓解背部肌肉紧张，减轻椎体负荷[31]，有效改善髋关节调节策略，提高人体运动性能和预防运动损伤。PNF 联合 SPS 可以通过激活最大数量的运动肌纤维和提高肌肉疲劳耐受水平，显著改善其肌肉耐力与肌肉收缩能力，调整腰椎和骨盆的异常位置，更有助于脊柱运动功能的恢复，达到了延缓 AIS 发展的目的，弥补了单一康复方式的缺失。

本研究存在一定的局限性。由于多裂肌的肌电易受到周围肌肉活动的干扰，因此对肌电极放置的位置要求极高，采集较为困难。此外，本研究干预时长较短，应追踪半年以上的时间来观察干预方案的持续有效性。目前，PNF 疗法和 SPS 训练在国内还尚处于起步阶段，未来该领域还需要更多研究来进一步证实疗法对不同弯曲异常类型的长期疗效。

作者贡献：聂丹宁提出主要研究目标，负责研究的构思与设计，研究的实施，撰写论文；聂丹宁、陶昱如进行数据的收集与整理，统计学处理，图、表的绘制与展示；史曙生负责文章的质量控制与审查，对文章整体负责，监督管理。

本文无利益冲突。

聂丹宁 https://orcid.org/0009-0009-3472-9936

参考文献

[1] 易敏，顾峥奕，郭亚文，等. 上海市静安区中小学生脊柱弯曲异常现状及影响因素分析［J］. 实用预防医学，2024，31（8）：956-960. DOI：10.3969/j.issn.1006-3110.2024.08.014.

[2] 关欢欢，李筱贺，高尚，等. 青少年特发性脊柱侧凸的发病机制及非手术治疗［J］. 中国医药导报，2019，16（21）：28-31.

[3] MARUYAMA T，KITAGAWA T，TAKESHITA K，et al. Conservative treatment for adolescent idiopathic scoliosis：can it reduce the incidence of surgical treatment?［J］. Pediatr Rehabil，2003，6（3/4）：215-219. DOI：10.1080/13638490310001642748.

[4] NEGRINI S，FUSCO C，MINOZZI S，et al. Exercises reduce the progression rate of adolescent idiopathic scoliosis：results of a comprehensive systematic review of the literature［J］. Disabil Rehabil，2008，30（10）：772-785. DOI：10.1080/09638280801889568.

[5] 邹一鸣，赵检，白锦毅，等. 特发性脊柱侧凸的生物力学特点及治疗策略研究进展［J］. 第二军医大学学报，2019，40（4）：356-361. DOI：10.16781/j.0258-879x.2019.04.0356.

[6] STRUHÁR I，KAPOUNKOVÁ K，VENCÚRIK T. The role of spiral stabilization exercise on the level of postural stabilty［J］. Jhse，2015，10（Proc1）. DOI：10.14198/jhse.2015.10.proc1.15.

[7] NEGRINI S，DONZELLI S，AULISA A G，et al. 2016 SOSORT guidelines：orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth［J］. Scoliosis Spinal Disord，2018，13：3. DOI：10.1186/s13013-017-0145-8.

[8] STĘPIEŃ A. A range of rotation of the trunk and pelvis in girls with idiopathic scoliosis［J］. Postepy Rehabilitacji，2011，25：5-12.

[9] MAREK S M，CRAMER J T，FINCHER A L，et al. Clinical Studies – Acute Effects of Static and Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching on Muscle Strength and Power Output［J］. Journal of athletic training，2005，40（2）：94-103.

[10] OLIVO S A，MAGEE D J. Electromyographic assessment of the activity of the masticatory using the agonist contract-antagonist relax technique（AC）and contract-relax technique（CR）［J］. Man Ther，2006，11（2）：136-145. DOI：10.1016/j.math.2005.06.015.

[11] 国家卫生健康委员会.《儿童青少年脊柱弯曲异常防控技术指南》及编写说明［EB/OL］.（2011-11-01）［2024-08-16］. http://www.nhc.gov.cn/jkj/s5899tg/202111/5579c1240d034ac680a7505994aa082d.

[12] 刘永皑，曾庆平，魏亚涛，等. 基于脊柱螺旋稳定的运动疗法治疗青少年特发性脊柱侧凸的临床效果［J］. 中国当代医药，2023，30（25）：96-99. DOI：10.3969/j.issn.1674-4721.2023.25.024.

[13] MOHAMED R A，YOUSEF A M. Impact of schroth three-dimensional vs. proprioceptive neuromuscular facilitation techniques in adolescent idiopathic scoliosis：a randomized controlled

study [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci，2021，25（24）：7717-7725. DOI：10.26355/eurrev_202112_27618.
[14] 陈灵慧，郑琦，李岩，等. 在核心稳定训练基础上联合呼吸训练对慢性非特异性腰痛患者前馈控制的效果[J]. 中国康复理论与实践，2024，30（6）：737-744. DOI：10.3969/j.issn.1006-9771.2024.06.015.
[15] DEMOULIN C，VANDERTHOMMEN M，DUYSENS C，et al. Spinal muscle evaluation using the sorensen test：a critical appraisal of the literature [J]. Joint Bone Spine，2006，73（1）：43-50. DOI：10.1016/j.jbspin.2004.08.002.
[16] 邱丹，何辉，熊开宇，等. 青少年椎旁肌耐力及左右侧对称性测评指标和方法的建立[J]. 中国组织工程研究，2020，24(14)：2197-2204. DOI：10.3969/j.issn.2095-4344.2582.
[17] 袁望舒，陈丽霞，沈建雄，等. 青少年特发性脊柱侧凸患者顶椎椎旁肌表面肌电信号与Cobb角及轴向躯干旋转角的相关性[J]. 中国组织工程研究，2019，23（24）：3824-3828. DOI：10.3969/j.issn.2095-4344.1223.
[18] 董佳兴，王连成，张金钗，等. 远程康复联合门诊治疗在轻度青少年特发性脊柱侧凸中的效果研究[J]. 中国全科医学，2022，25（32）：4065-4071. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0418.
[19] 徐静樨. 螺旋稳定肌肉链技术干预大学生特发性脊柱侧弯的效果研究[D]. 南京：南京体育学院，2022.
[20] 乔丹. 螺旋肌肉链训练对盘源性下腰痛患者的疗效观察[D]. 天津：天津体育学院，2024.
[21] ABBOUD J，NOUGAROU F，LARDON A，et al. Influence of lumbar muscle fatigue on trunk adaptations during sudden external perturbations [J]. Front Hum Neurosci，2016，10：576. DOI：10.3389/fnhum.2016.00576.
[22] NECHVÁTAL P，HITRÍK T，KENDROVÁ L D，et al. Comparison of the effect of the McKenzie method and spiral stabilization in patients with low back pain：a prospective，randomized clinical trial [J]. J Back Musculoskelet Rehabil，2022，35（3）：641-647. DOI：10.3233/BMR-210055.
[23] 梁斌，楚野，尹东，等. PNF技术联合高压氧治疗脊髓损伤合并不完全性截瘫患者的临床疗效观察[J]. 中国临床新医学，2016，9（1）：16-19. DOI：10.3969/j.issn.1674-3806.2016.01.05.
[24] KJ P，RAJESWARI R，VPR S. Effectiveness of scapular proprioceptive neuromuscular facilitation（PNF）techniques in adhesive capsulitis of the shoulder joint [J]. Journal of Physiotherapy Research，2017，1（2）.
[25] ARUL PRAGASSAME S，VK M K，SOUNDARYA N. A comparative study on the effectiveness of PNF stretching versus static stretching on Pain and Hamstring flexibility in osteoarthritis knee patients [J]. Ijrps，2019，10（3）：1789-1794. DOI：10.26452/ijrps.v10i3.1312.
[26] FADER L，NYLAND J，LI H，et al. Radial nerve palsy following humeral shaft fracture：a theoretical PNF rehabilitation approach for tendon and nerve transfers [J]. Physiother Theory Pract，2022，38（13）：2284-2294. DOI：10.1080/09593985.2021.1938310.
[27] 覃彪民，老锦雄，穆瑞琴. 针刺结合PNF治疗特发性面神经麻痹[J]. 中国康复，2007，22（2）：98. DOI：10.3870/j.issn.1001-2001.2007.02.037.
[28] SHIN G，SHU Y，LI Z，et al. Influence of knee angle and individual flexibility on the flexion-relaxation response of the low back musculature [J]. J Electromyogr Kinesiol，2004，14（4）：485-494. DOI：10.1016/j.jelekin.2003.12.001.
[29] 王雪强，陈佩杰，矫玮，等. 运动疗法治疗腰痛的专家共识[J]. 体育科学，2019，39(3)：19-29. DOI：10.16469/j.css.201903003.
[30] 曾庆平. 中医整脊联合螺旋稳定训练治疗青少年特发性脊柱侧凸的临床研究[D]. 广州：广州中医药大学，2023.
[31] 杨倩倩，任凤. 本体感觉神经肌肉促进技术治疗慢性非特异性腰痛的机制及效果进展[J]. 河北医科大学学报，2023，44(1)：120-124. DOI：10.3969/j.issn.1007-3205.2023.01.024.

（收稿日期：2024-11-24；修回日期：2024-12-25）
（本文编辑：康艳辉）